

## 非軸対称非球面ミラーの研削に関する研究

著者	立花 亨
号	1904
発行年	1996
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/7177">http://hdl.handle.net/10097/7177</a>

氏 名	たちばな とおる 立 花 亨
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)精密工学専攻
学位論文題目	非軸対称非球面ミラーの研削に関する研究
指導教官	東北大学教授 庄司 克雄
論文審査委員	主査 東北大学教授 庄司 克雄    東北大学教授 江村 超 東北大学教授 清野 慧    東北大学助教授 厨川 常元

## 論文内容要旨

### 第1章 序 論

近年、集積回路の露光プロセスの分野をはじめとし、可視光線に代わって、波長の短い紫外線、X線などの光源を利用した光学素子の需用が高まってきている。このようにX線用光学素子は望遠鏡、顕微鏡、微量分析器などの分野で、またシンクロトロン放射光素子は半導体製造やマイクロデバイス製作などに用いられるようになってきた。

一般に短い波長(0.5 $\mu\text{m}$ から数Å)のいわゆる軟X線の光源は、あらゆる物質の垂直入射に対する反射率が零になるため可視領域での光学レンズなどのような透過光学系は使用不可能となる。そこで図1に示す斜め入射形光学系が主に用いられる。X線等の短波長光を集光し高分解能の結像を得るためにこれらの光学素子には図のような円筒面やトロイダル面、二次曲面などのいわゆる非球面ミラーが用いられる。集光した短波長光は大きなエネルギーを持つため、素子の母材には熱膨張が小さく、熱損傷しにくい炭化けい素(SiC)が用いられる<sup>1)</sup>。SiCは硬脆材料であるが、ミラー素材として用いる場合、表面粗さと形状精度とを同時に満足しなければならないことが、非球面加工で最も難しい点である。

これまでの非球面研削に関する研究では5軸<sup>2)4)</sup>、4軸制御<sup>5)</sup>、あるいは軸対称非球面の場合は2軸制御<sup>6)7)</sup>の研削盤を用いて常に研削点がホイール断面上のほぼ1点になるように制御されている。これはホイールのツルーイング精度が研削精度に影響しないように工夫しているためであるが研削点に変化せずホイール摩耗が1点に集中する。したがってホイール寿命が短く、研削性能が劣化し易い。この問題点を解決するためには、1点に固定されていた研削点を移動させればよい。本研究ではホイール断面を円弧に成形し、その円弧断面の包絡により、任意の形状を創成研削する方法について検討することにする。この研削法では研削点がホイール円弧断面上を移動するために、摩耗の分散が図られる。本論文では、主にこの円弧ツルーイングの技術を社会的ニーズの極めて高い非球面ミラーの高精度研削法に適用し、その研削技術の実用化を図ることを目的とする。主な目的は以下の4つに大別できる。①円弧包絡研削法に基づく円弧断面ホイールの設計指針を得ること。②極微粒ホイールに対応したツルーイング技術の確立を行うこと。③平面研削盤用円弧ツルアの試作と円弧ツルーイング条件の最適化を行うこと。④円弧包絡研削法により各種形状の非軸対称非球面ミラーの研削を行うこと。

### 第2章 円弧包絡研削法による曲面創成研削

#### 2.1 緒 言

本章では、極微粒ダイヤモンドホイールを曲面研削加工に応用するための方法として円弧断面を有するダイヤモンドホイールによる曲面創成研削法について述べる。本方法は、ホイール断面の円弧を包絡することにより工作物表面に曲面を創成するものであり、円弧包絡研削法と呼ぶことにする。

従来の曲面創成研削では、ホイールの研削点を3次的に走査することにより曲面を創成する。しかしこの場合、

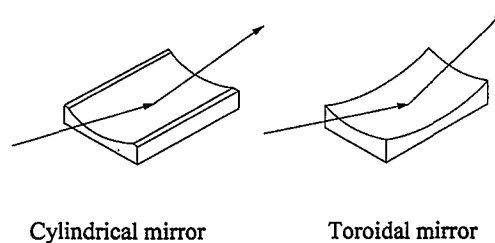


Fig. 1 Aspheric mirror

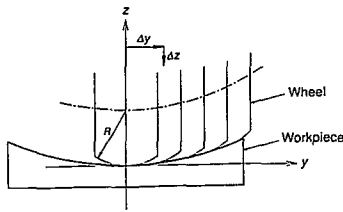


Fig. 2 Form generation grinding by arc envelope grinding method

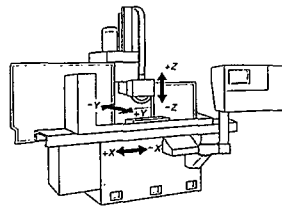


Fig. 3 3-axis controlled surface grinding machine

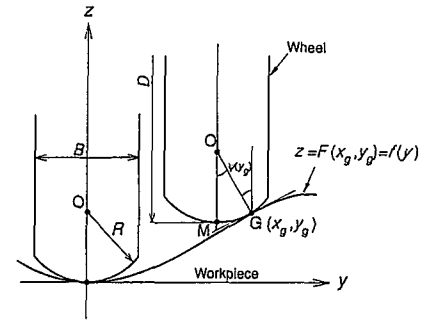


Fig. 4 Arc profiled wheel and workpiece

ホイール断面上の研削点が変化しないためホイールの局部摩耗が著しく、研削加工の持続性、加工精度、加工後の工作物表面品位を考えた場合、不利である。そこで本章では、円弧断面を有するホイールを用い、研削点が断面上を移動するようにして研削する方法を提唱する。この研削法では上述の欠点は解消され、高精度、高品位な鏡面研削加工が持続するものとする。

## 2.2 円弧包絡研削法

幅広のホイールと CNC 3 軸制御の研削盤を用いて曲面創成研削を行うためにはホイール断面も曲率を有していなければならない。ホイールのツルーイング、ドレッシングを考えた場合、その断面形状は最も単純な円形（円弧）が最も容易である。そこで本論文では、図 2 に示すような円弧断面を持ったダイヤモンドホイールによる曲面創成研削法（円弧包絡研削法）を提案する。本方法は、図 3 に示すような CNC 同時 3 軸制御の横軸平面研削盤を用いてホイールの位置制御を行い、ホイール断面である円弧の包絡により曲面を創成するものである。この方法では凸形状、凹形状どちらの形状でも創成が可能であり、さらにトロイダル形状のような非軸対称非球面も研削できる。また、図 2 に示すように研削点がホイール断面上を順次移動するため、ホイールの円弧と幅を適切に設計することによりホイール全幅を有効に利用することが可能である。その結果、ホイール摩耗が幅方向に分散され、従来の曲面創成研削法の問題点が解決されるものと期待される。ただし、この円弧包絡研削法ではホイールの断面形状が工作物断面に転写されるため円弧断面を高精度にツルーイングする必要がある。

**2.2.1 ホイール形状** 図 3 の横軸平面研削盤のテーブルの縦（左右）方向を  $x$  軸、横（前後）方向を  $y$  軸、ホイール切込み方向を  $z$  軸とし、テーブル上に原点をとる。この  $xyz$  座標系に基づいて、工作物の形状を  $z = F(x, y)$  で表わす。厳密に言えば研削中のホイールと工作物は面で接触するが、ホイール半径切込量が小さいため点接触と考えることができる。いまこの接触点を研削点と呼び  $G(x_g, y_g, z_g)$  とすれば、研削点  $G$  を通る工作物の  $yz$  断面は図 4 に示したように  $z = F(x_g, y_g)$  で表せる。図で  $D$  はホイールの最大直径、 $B$  はホイール幅、 $R$  は円弧断面の半径である。

ここでホイール形状に対する制約条件について考える。

まずホイールの断面は全幅が 1 つの円弧から成るから、次式が成り立つ。

$$B \leq 2R \quad (1)$$

次に、ホイールの全幅が有効に使用されるためには研削点  $G(x_g, y_g, z_g)$  がホイールの円弧断面上になければならないから、円弧断面の半径  $R$  は次式を満足しなければならない。

$$R \cdot \sin \psi(y_g) \leq \frac{B}{2} \quad (2)$$

ここで、 $\psi(y_g)$  は、図 4 に示したようにホイール断面の中線が円弧断面と交わる点を  $M$ 、円弧の中心を  $O$  とすれば、次式で与えられる。

$$\psi(y_g) = \angle GOM = \arctan \left| \frac{\partial}{\partial y} F(x_g, y_g) \right|$$

さらに凹面を研削する場合には、ホイールの  $R$  および  $D$  の値は、研削点  $G$  における工作物の  $yz$  および  $xz$  断面の曲率半径よりも小さくなければならないから、

$$R \leq \rho(y_g) = \frac{\left\{ 1 + \left( \frac{\partial}{\partial y} F(x_g, y_g) \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\frac{\partial^2}{\partial y^2} F(x_g, y_g)} \quad (3)$$

$$D \leq \frac{2 \left\{ 1 + \left( \frac{\partial}{\partial x} F(x_g, y_g) \right)^2 \right\}^{\frac{3}{2}}}{\frac{\partial^2}{\partial x^2} F(x_g, y_g)} + 2R(1 - \cos \psi(y_g)) \quad (4)$$

である。ここで $\rho(y_g)$ は、Gを通る工作物のyz断面の曲率半径を表わす。

2.2.2 カスプの計算 実際の研削ではホイールにはy軸方向に断続的なクロス送り $\Delta y$ が与えられるため、図5に示すようないわゆるカスプ(=PQ)が形成される。

この場合、カスプの高さ $E_w$ (=PQ)は、 $O'Q - O'P$ であるから次式で与えられる。

$$E_w(y_g) = \rho(y_g) - R \frac{\sin(\theta + \omega)}{\sin \theta} \quad (5)$$

いま一例として、任意のxz断面が直線で、yz形状が放物線 $z = ay^2 = 0.0045y^2$ である凹型の放物柱面を考える。これを円弧半径 $R=20\text{mm}$ ,  $50\text{mm}$ ,  $80\text{mm}$ のホイールで研削したときのカスプ高さ $E_w$ を計算した。そこで $R$ をパラメータにして、 $E_w(y_g=12.5)$ とクロス送りピッチ $\Delta y$ との関係を図6に示した。当然ながら、 $R$ が大きくなると $\Delta y$ が小さい程、 $E_w$ は小さくなる。しかし $\Delta y$ は全研削時間と反比例の関係にあるから、必要以上に $\Delta y$ を小さくすることは不経済である。したがってカスプ高さを小さくするためには、 $\Delta y$ を小さくするよりも $R$ を大きくする方が有利である。実際のホイール設計に当たっては研削盤、円弧ツールなど装置による制約およびホイール製作上の制約を考慮し、(1)~(4)の条件を満たす範囲でできるだけ大きな $R$ 、 $D$ を選定すれば良い。

### 2.3 結言

- (1)円弧包絡による曲面創成研削法すなわち円弧包絡研削法では、研削点がホイール軸方向に移動することによりホイール全幅を有効に利用することでホイール摩耗が均一化し、寿命が延びる。ただし、ホイール形状が工作物に転写されるため、ホイール断面を正確に円弧にツルーイングする必要がある。
- (2)ホイール軸の移動制御方法としてホイールを軸方向に等ピッチに移動してもホイール断面の曲率半径 $R$ が大きくなるとクロス送り量 $\Delta y$ が小さい場合、誤差は無視できるほど小さい。
- (3)与えられた工作物断面形状の最大中心角よりもホイール断面の最大中心角が大きくならなければならない。また工作物が凹型の場合はホイール円弧断面の半径 $R$ およびホイール最大直径 $D$ は研削点Gにおける工作物のyzおよびxz断面の曲率半径より小さくならなければならない。
- (4)ホイール断面の曲率半径 $R$ が大きくなるとクロス送り量 $\Delta y$ が小さいほどカスプ高さ $E_w$ は小さくなる。

## 第3章 極微粒ダイヤモンドホイールのツルーイング・ドレッシング

### 3.1 緒言

一般に、短波長光のビームは高エネルギーを有しているため、ミラーの材料としてはセラミックスを代表とする高融点材料が望ましいといわれている<sup>8),9)</sup>。しかしその加工が難

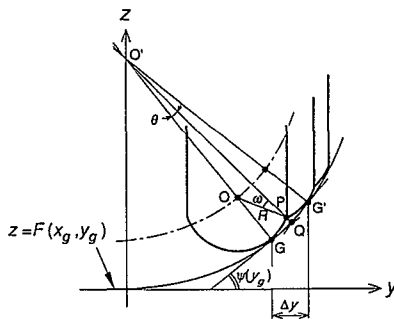


Fig. 5 Cusp generated on the workpiece

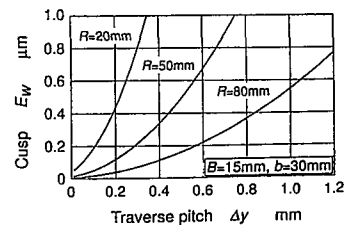


Fig. 6 Cusp generated on the workpiece  
(Effect of traverse pitch and radius  $R$ )

Table 1 Truing condition

Grinding machine	Ultra-precision surface grinding machine
Diamond wheel	SD3000P150B
Wheel size	200D6T3X, 1A1
Wheel speed	380m/min
Truer speed	200m/min
Depth of cut	1mm/pass
Table speed	0.4m/min
Truing fluid	Tap water, 1.2mL/min
Truer wheel	90D20W, Cup
Vitrified bond	GC3000AV, BV, CV, DV, EV
Resinoid bond	GC1500B, GC3000B, GC6000B, GC8000B

しく、その効率的な加工法はまだ確立していないのが現状である。このセラミックスを創成加工する方法としてはダイヤモンドホイールを用いた研削加工が最も適しており、本研究において使用するホイールはレジノイドボンドのものを選定する。レジノイドボンドは弾性率が小さいために研削中の砥粒の弾塑性変位量が大きく、実有効砥粒切れ刃数が大きくなり、極端に粒径の小さな砥粒を選定しなくても良好な面粗さが得られるという利点がある。

本研究では#600 ホイールで粗研削、#1500 ホイールで中研削、#3000 ホイールで仕上げ研削を行うこととする。そしてそれらのホイールを高精度にツルーイング・ドレッシングする方法として、庄司らが開発したカップツルア法<sup>10),11)</sup>を採用する。ここで#600 と#1500 ホイールのツルーイング・ドレッシングに関してはこれまでも実績があり<sup>12)</sup>、ビトリファイドボンド GC ツルア砥石を用いて行えば良好な砥粒切れ刃状態を得ることが可能である。しかし極微粒ホイールの場合は、これらと同じ条件では高精度にツルーイング・ドレッシングすることはできない。そこでまず最初にカップツルア法の原理、利点について論じ、従来から使用しているビトリファイドボンド GC カップ砥石を用いたツルーイング・ドレッシングでの問題点を明らかにする。そして極微粒ダイヤモンドホイールを高精度に、しかも本来ホイールが有している性能を十分に発揮させるようなツルア砥石の条件について検討し、極微粒ホイールのツルーイング・ドレッシング専用の GC ツルア砥石を開発する。最後に、このツルア砥石のツルーイング性能、ツルーイングしたホイール作業面の砥粒切れ刃密度、ホイールの研削特性について比較検討する。

### 3.2 カップツルア法の原理と特徴

カップツルア法によるツルーイング・ドレッシングにおいては、ダイヤモンドホイールは GC ツルア砥石を切削し、その表面から切屑として GC 砥粒が脱落する。この GC 砥粒は滴下されるツルーイング液と混合しスラリー状となり、ツルア砥石の上に残留する。このスラリーは、ダイヤモンドホイールと GC 砥石の接触領域に侵入し、ダイヤモンドホイールの結合剤をラッピングにより除去する。そのため砥粒切れ刃自体に与えるダメージが非常に小さく、砥粒の脱落も少ないのが特長である。したがって切れ味のよい砥粒切れ刃が多いホイール表面が得られる。さらに、カップツルア法ではドレッシング工程が不要である。このためホイール形状の劣化が無く、高精度のツルーイングが可能となる。

### 3.3 レジノイドボンド GC ツルア砥石の開発

極微粒ダイヤモンドホイールを高精度に、しかも砥粒切れ刃密度が高くなるようにツルーイングするためには、ツルーイング時に必要な GC スラリーの発生が容易で、粒度が細かくかつ均一である必要がある。そのためには GC 砥粒の保持力が小さく容易に脱粒する結合剤が必要である。さらに砥石自体の機械的強度も高くなければならない。すなわち、ツルア砥石の機械的強度を保ちながら、個々の GC 砥粒はツルーイングの際の作用力で容易に脱落するような相反する性質を持つツルア砥石を開発する必要がある。

そこで、①焼成温度が低い、②いろいろな材料特性を有する材料が開発されている、③微粒 GC 砥粒と混合させやすい、等の特徴を有するレジノイドボンドを結合剤として選定した。

砥石の作製にあたっては、ビトリファイドボンドの場合のような結合むらを無くするために、最初に個々の GC 砥粒を液状レジノイドボンドに浸漬してコーティングし、比較的低温で加圧焼成した。その結果、適当な機械的強度を有するが、個々の砥粒は比較的容易に脱落する GC ツルア砥石を開発することができた。

### 3.4 ツルーイング性能

新たに開発した極微粒ダイヤモンドホイール専用 GC ツルア砥石を用いて、表 1 に示す条件でツルーイングを行った。ツルーイング時のスラリー粉の SEM 写真から粒径分布を求めた。図 7 に結果を示す。ビトリファイドボンドの場合と異なり、原粒とほぼ同じ分布を示すことが分かる。これは、レジノイドボンド GC ツルア砥石が均一なマトリックス型の組織で、しかも砥粒相互の結合が弱いために、ツルーイングの際に原粒粒径に近い粒径のスラリーを発生したものと考え

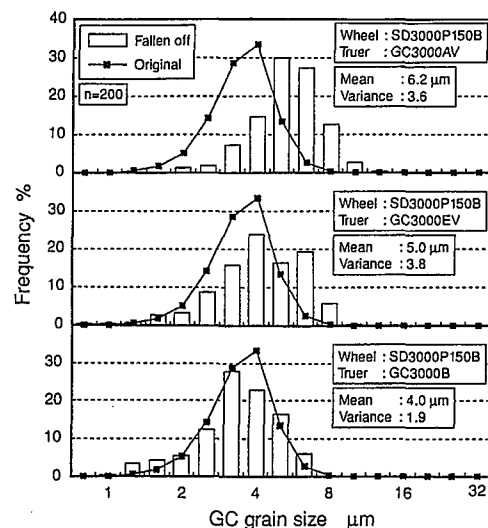


Fig. 7 Grain distribution

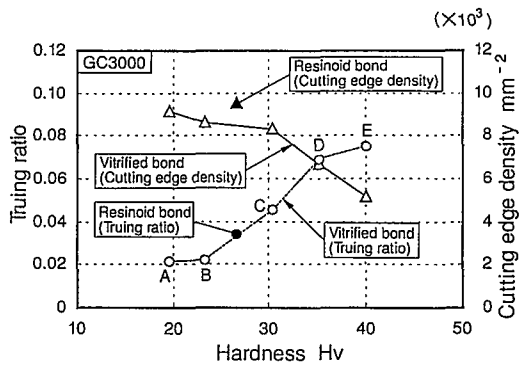


Fig. 8 Influence of hardness of GC cup truer on truing performance

Table 2 Grinding condition

Diamond wheel	SD3000P150B D200mm×W6mm
Workpiece	SiC L70Tmm×W5mm
Feed method	Plunge cut
Wheel speed	30m/sec
Table speed	1m/min
Wheel depth of cut	0.5mm/pass
Grinding fluid	Solution type, 2%, 13L/min

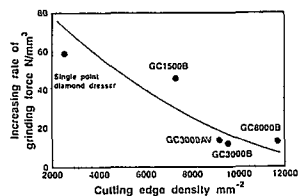


Fig. 11 Increasing rate of grinding force

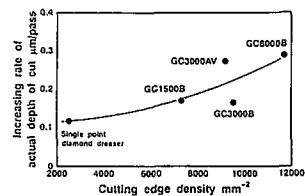


Fig. 12 Increasing rate of actual depth of cut

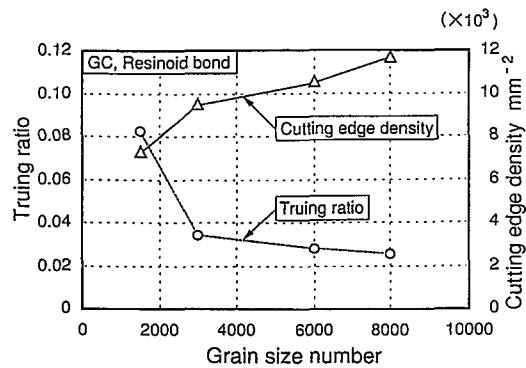


Fig. 9 Grain size number and truing performance

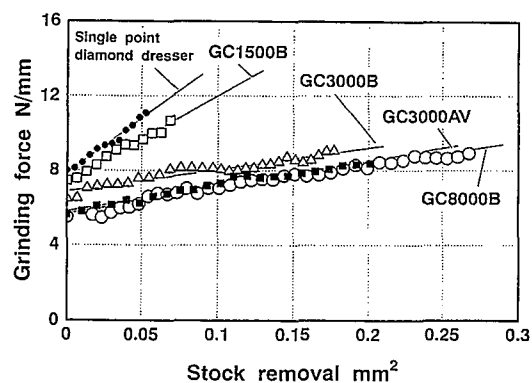


Fig. 10 Increasing of grinding force

られる。またツルア砥石全体の機械的強度は充分で、ツルイーグ中に台金から砥石が剥離、破損することはなかった。そこで表1に示したように粒径の異なるレジノイドボンドGCツルア砥石を作製し、実験に供した。

その結果、硬度、ツルイーグ比ともに図8に示すようにビトリファイドボンドのBとCの中間の値となり、ビトリファイドボンドのデータ線となった。一方、砥粒切れ刃密度はビトリファイドボンドのデータ線より上に位置し、GC3000AVでツルイーグした場合と比較しても大きな値をとった。これはツルイーグ時に発生するGCスラリ粉の粒度が、ビトリファイドボンドに比べレジノイドボンドの方が小さいためであると考えられる。

次に、使用するGC砥粒の粒番を変えてツルイーグ実験を行った。図9からわかるように、粒度が細くなるに従い砥粒切れ刃密度は増大し、GC8000BではGC3000AVの約1.4倍となった。この値は理論砥粒切れ刃密度の約85%で、今回試作したレジノイドボンドGCツルア砥石が極微粒ダイヤモンドホイールのツルイーグに適していることを示している。

### 3.5 砥粒切れ刃密度と研削性能の関係

研削抵抗の増加過程を各種のツルア砥石で比較した。表2に研削条件を示す。結果を図10に示す。ツルア砥石がGC8000Bの場合、研削抵抗の初期値、増加率とも最も小さい。次に、図11より、砥粒切れ刃密度が大きいほど、研削抵抗増加率は小さいことがわかる。図12に示すように1パスあたりの実切込量は砥粒切れ刃密度とよい相関が見られ、砥粒切れ刃密度が高いほど実切込量も大きな値となった。図13は砥粒切れ刃密度が大きいほど粗さが向上することを示す。また図14のようにホイール半径減耗量は砥粒切れ刃密度の増加にしたがい指数関数的に減少する。

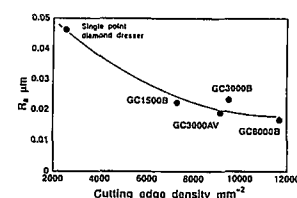


Fig. 13 Surface roughness

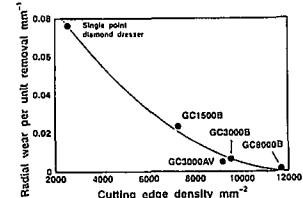


Fig. 14 Radial wheel wear

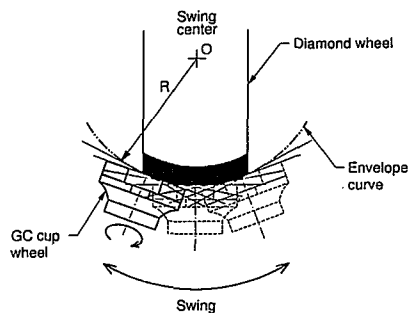


Fig. 15 Principle of arc truing

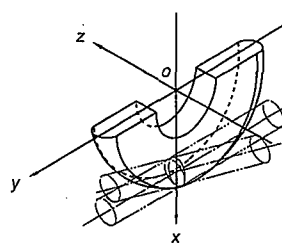


Fig. 16 Arc profile by envelope of straight lines

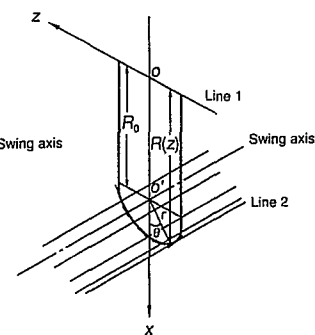


Fig. 17 Sectional view of wheel

### 3.6 結 言

- (1)従来のビトリファイドボンド GC ツルア砥石から発生するスラリの粒径分布は、原粒の粒径分布より大きな方向へ偏る。一方、開発したレジノイドボンド GC ツルア砥石のスラリ粒径分布は原粒の粒径分布とほぼ一致し、均一で小さな粒径のスラリが発生する。
- (2)開発したレジノイドボンド GC ツルア砥石を使用することにより、砥粒は容易に脱落するが、十分な機械強度を有するというツルア砥石に必要な条件を具備している
- (3)レジノイドボンド GC ツルア砥石を使用することにより、砥粒切れ刃密度、ツルーイング比ともに高い値が得られる。GC8000B ツルア砥石の場合、砥粒切れ刃密度は、理論砥粒切れ刃密度の 85%に達する。
- (4)ツルーイング後の砥粒切れ刃密度が大きいほど研削抵抗増加率は小さくなり、実切込量は大きくなる。仕上面粗さ、ホイール摩耗量は小さくなる。

## 第4章 カップツルアによる円弧ツルーイング法

### 4.1 結 言

本章では、円弧ツルーイング法の原理とその適用方法について述べ、断面形状におよぼすアライメント誤差要因の解析をおこない円弧ツルーイング方法の高精度化を図る。そして第3章で新開発したレジノイドボンド GC ツルア砥石を用いた新しい円弧断面ホイール用ツルア<sup>13),14)</sup>（以下、円弧ツルアと呼ぶ）を開発する。さらにこの円弧ツルアを用いてツルーイングを行った場合のホイールおよびツルアの接触点の軌跡をシミュレーションし、ツルーイング条件の最適化手法について検討する。また実際にツルーイング実験を行い、シミュレーション結果を検証する。

### 4.2 円弧ツルーイング法の原理とその特徴

従来の研究では平形ホイール用カップツルアはホイール軸にトラバース送りを与えないため、精度の高いホイール矩断面形状が得られる<sup>15)</sup>。このことを利用すれば、直線包絡により、ホイール断面を円弧にツルーイングできるものと考えられる。すなわち、図15に示すように、従来の平形ホイール用カップツルアに往復運動を与えながら中心Oの周りに旋回させれば、直線包絡により円弧断面を創成することができる。これが円弧ツルアの基本原理である。その際、往復運動に連動してカップツルアに切込みが与えられるが、ツルア砥石には低結合度のGC砥石が使用されるため、毎回の切込み量は完全に除去され旋回半径には影響を与えない。その上、同時にドレッシングも行われる<sup>16)</sup>ため、ツルーイング後に改めてドレッシング工程を入れる必要がなく、ドレッシングによる形状精度の劣化を避けることができる。庄司らは、カップ型の通常砥石を用いてツルーイングを行えば、ドレッシングが不要であり、しかも高い真直度が得られることに着目し、直線包絡による円弧断面ツルーイング装置を開発している<sup>17)</sup>。この円弧ツルアは円筒研削盤用であり、直線包絡によりCBNホイールを円弧断面にツルーイングできることを示しそのツルーイング精度について検討している。その結果、次のような要因がツルーイング精度に大きく影響することを明らかにした。(1)円弧ツルア各部の剛性、(2)カップツルア切込み送りの精度、(3)カップツルア切込み送りの制御方法。

そこで、これらの問題点を検討し、平面研削盤上で極微粒ダイヤモンドホイールを高精度でツルーイングすることのできる円弧ツルアを新たに設計、試作することにした。

### 4.3 ホイール円弧断面形状に与えるアライメント誤差の影響

ここでまず円弧ツルアの運動誤差（以下、アライメント誤差と呼ぶ）がホイール円弧断面形状に与える影響について考察し、円弧ツルア装置の高精度化を検討した。

図16は、ツルア（カップ砥石）上面がツルーイング時に描く創成面とホイールとの干渉の様子を示したものである。いま図のように、ホイール中心に原点Oを置き、垂直軸をx軸、水平軸をy軸、ホイール回転軸をz軸（Line 1）とする(x, y, z)座標系を設定する。図17は、ホイールの断面形状を半径R(z)で表し、ツルアによる創成運動の軌跡（Line 2）

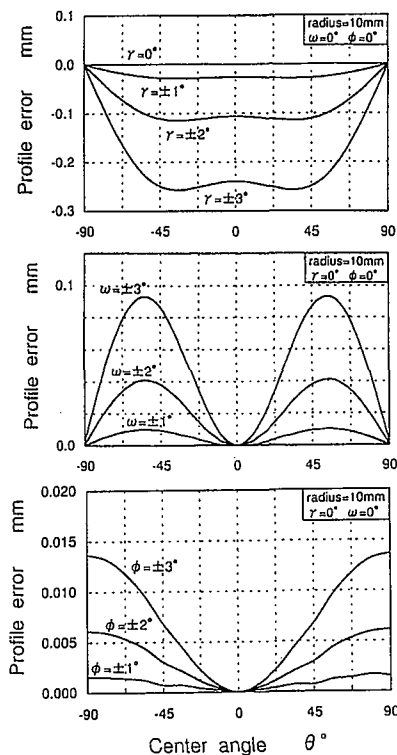


Fig. 18 Influence of inclination  $\gamma, \omega, \phi$  of truer swing unit motion

図 16 に示すように一葉双曲面を形成する。

最後にツルア旋回部の往復運動の軌跡とツルア旋回軸が共に $\omega$ だけ傾いた場合を考える（この場合の $\omega$ を $\phi$ と置く）。これらの結果を基にして、所与の旋回半径 $r$ からの偏差をツルーイングによるホイール断面の形状誤差と定義して、 $\gamma, \omega, \phi$ のアライメント誤差による影響について調べた。図 18(a)に $\gamma$ 、図 18(b)に $\omega$ 、図 18(c)に $\phi$ をそれぞれ単独に変化させたときのホイール断面形状誤差を示す。

#### 4.4 円弧ツルアの試作

前節の検討結果に基づき、新たに円弧ツルアを試作した。図 19 に、円弧ツルアの構成を示す。基本的に、以下の 3 つの運動機構を持つ。カップツルア（通常砥石）の回転①はカップツルアユニット（GC 砥石回転機構部）のスピードコントロールモータとタイミングベルトを組み合わせることで、切込み動作②は、直動ベアリングをガイドにして、ステッピングモータとボールネジの組み合わせで最小  $1\mu\text{m}$  単位の切込みが可能である。旋回運動③は、旋回揺動部で旋回用のステッピングモータとウォームを組み合わせることでステッピングモータの出力パルス数をカウントすることにより与えた。円弧ツルアの水平往復運動は研削盤のテーブル送りによって与えた。

また試作にあたり次の点を考慮した。まず旋回軸の支持剛性の向上を図り、アライメント誤差を小さくした。その結果、剛性はツルア部で  $9.8\text{ N}/\mu\text{m}$  になった。ツルア面の振れは  $5\mu\text{m}$  ( $\phi 90\text{mm}$ )、ツルア回転軸と旋回軸の直角度は  $10\mu\text{m}$ 、切込みスライド面の真直度は  $3\mu\text{m}/40\text{mm}$  以内、旋回軸と切込みスライド面の直角度は  $5\mu\text{m}/40\text{mm}$  以内、また図 18 で示されるように、ツルーイングにおける形状誤差を低減するため最も影響の大きい $\gamma$ を考慮した。ツルア旋回部の往復運動の軌跡と旋回軸（ $y$  軸）との平行度（すなわち $\gamma$ および $\omega$ ）は  $10\mu\text{m}/40\text{mm}$  以内とした。また研削盤テーブル移動軌跡に対する旋回軸の平行度（すなわち $\phi$ ）は、 $5\mu\text{m}/40\text{mm}$  以内にした。

#### 4.5 円弧ツルーイング法におけるホイールとカップツルア砥石の接触点の軌跡の解析

本章で開発した円弧ツルアは平形ホイール用カップツルアを用いて、極微粒ダイヤモンドホイールの円弧断面形状を直線包絡により創成するものである。ここでホイール円弧断面形状を良好にするツルーイング条件の最適化手法を検討するためカップツルアが極微粒ダイヤモンドホイール表面をツルーイングする機構を解析する。そのためカップツルアとホイールの接触点の軌跡の移動パターンに着目してシミュレーション解析を行った。ホイールとツルア砥石の接触点位置がホイール円弧断面上を順次移動し円弧上に均一な接触を生じさせることができる場合を最適条件とし、接触点位置が円弧上に特定化されており一定のサイクル数を与えてツルーイングを行ってもホイールとツルア砥石との未接触部

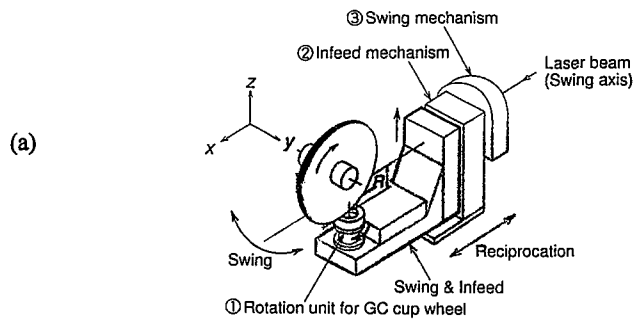


Fig. 19 Schematic drawing of Arc Truer

との関係を示したものである。図に示したように、ツルアによる創成運動の軌跡通りにホイールが成形されると仮定すれば、ホイール半径  $R(z)$  は 2 つの直線 Line 1 ( $z$  軸) と Line 2 との距離、すなわち共垂線の長さになる。 $z$  軸 (Line 1) と Line 2 の共垂線の長さ  $R(z)$  と  $z$  座標はツルーイングによって創成されるホイール断面形状を与える。

次に、以下に示すように 3 つのアライメント誤差を想定し、ツルーイングされるホイール断面形状への影響を検討する。まずカップツルアが回転駆動されるツルア旋回部の往復運動の軌跡がアークツルア旋回軸（ $y$  軸に平行）に対して角度 $\gamma$ だけ傾き、円錐母面を形成する場合を考える。

次に正しく設置された旋回軸に対してツルア旋回部の往復運動の軌跡が角度 $\omega$ だけ傾きねじれの位置にある場合を考える。この場合、創成運動の軌跡 (Line 2 の直線群) は、



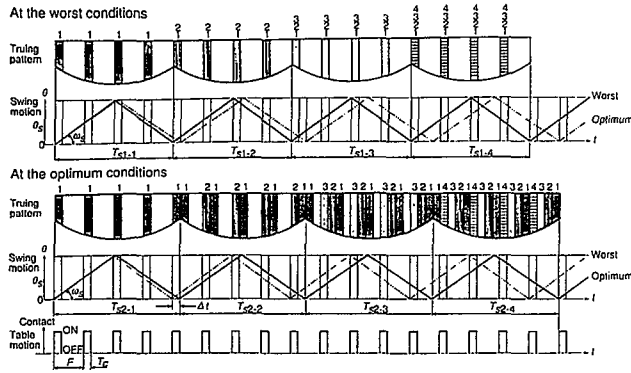


Fig. 20 The optimum and the worst conditions of arc truer swing motion by truing simulation

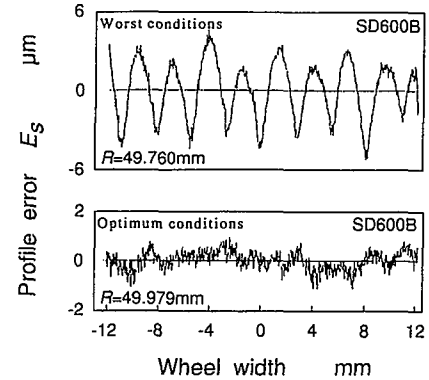


Fig. 21 Arc sectional profile error on the wheel surface by truing experiment

が生じる条件を不適条件とする。

図 20 に最適ツルーイング条件と不適ツルーイング条件でのシミュレーションモデルを示す。これは最適条件では 4 サイクルのツルア旋回動作でホイール円弧断面がいずれの箇所も均一な接触状態となることを表わしている。不適条件では接触点の位置が固定化され変化がない。

ここで円弧の近似半径との差を半径誤差  $E_r$ 、近似半径に対する断面形状の半径方向の誤差を形状誤差  $E_s$  と定義する。 $R=50.000\text{mm}$  と設定してツルーイングを行い、その形状誤差  $E_s$  を測定した。その測定例を図 21 に示す。図中には、近似した円弧の半径  $r$  も示した。図に示すように、最適条件では  $E_s$  は  $\pm 1\mu\text{m}$  であった。また不適条件では接触点が固定化され  $E_s$  は  $\pm 4\mu\text{m}$  であった。

なお本研削法においては、CNC 装置にホイール断面の半径の実測値を入力するため、ツルーイング時の半径誤差  $E_r$  は考慮しなくてよい。

#### 4.6 結 言

- (1)円弧ツルーイング法におけるホイール断面形状の創成機構をモデル化し、装置精度に起因するホイール断面形状誤差要因の解析を行った。この結果に基づき円弧ツルーイング装置の試作をしてツルーイングを行った場合、ホイール断面形状誤差を従来の 1/10 以下にすることができる。
- (2)ツルーイング時のホイールとツルア砥石の接触点の軌跡のシミュレーション解析に基づき各種ツルーイング条件下のホイールおよびツルア砥石の表面パターンから最適ツルーイング条件を設定した。
- (3)試作した円弧ツルアを用い最適条件下でツルーイング実験することにより従来装置の誤差を減少させ、最終的に形状誤差  $\pm 1\mu\text{m}$  の円弧ツルーイングを可能にした。

### 第 5 章 円弧包絡研削法による非軸対称非球面ミラーの創成研削

#### 5.1 緒 言

本章では、円弧断面を有するダイヤモンドホイールを用いて、実際に非軸対称非球面ミラーの研削実験を行う。工作物として炭化珪素セラミックスを選択し、それを各種形状の非軸対称非球面に研削加工する際の研削抵抗、ホイール摩耗、工作物の仕上面粗さ、形状精度などについて検討する。

#### 5.2 実験方法、条件

5.2.1 研削実験 本研究では、まず最初に非軸対称非球面の研削例として 2 種類の凹形放物柱面を、円弧包絡研削法により研削することにした。工作物形状は、 $z=0.0045y^2$  (放物柱面①) および  $z=0.0015y^2$  (放物柱面②) とした。実験装置は同時 3 軸 CNC 制御の横軸超精密平面研削盤 (オークマ製 GS-36N) を選定した。加工幅はそれぞれ  $b=27\text{mm}$ ,  $b=97\text{mm}$  とした。使用するダイヤモンドホイール幅はともに  $B=15\text{mm}$  とした。

研削は表 3 に示すような粒度の異なる 3 種類のホイールを用いて粗研削、中研削、仕上げ研削の順で行った。ツルーイング条件を同じく表 3 に示す。

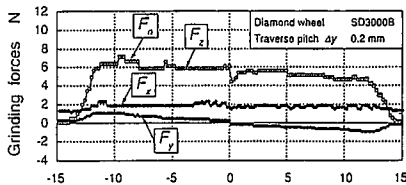
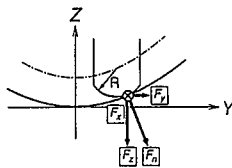
工作物形状の形状測定、粗さ測定には接触式形状測定器 (Rank Taylor Hobson 製 Form Talysurf S5 の非球面測定システム) を用いて行った。

#### 5.3 放物柱面①の研削

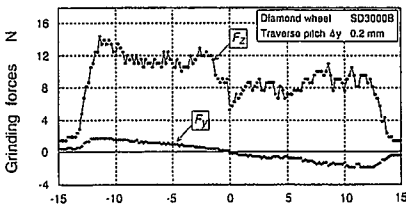
5.3.1 研削抵抗 図 22(a)は  $\Delta y=1.0\text{mm}$  のクロス送りを与えて SD600B ホイールで円弧包絡研削法によって研削したときの工作物中央 ( $y=0$ ) における法線抵抗  $F_z$ 、接線抵抗  $F_x$  の値を  $z$  軸方向の累積切込量についてプロットしたものである。次に、図 22(b)に  $\Delta y=0.5\text{mm}$  のクロス送りを与えて SD1500B ホイールで研削した場合の工作物中央 ( $y=0$ ) にお

Table 3 Experimental conditions

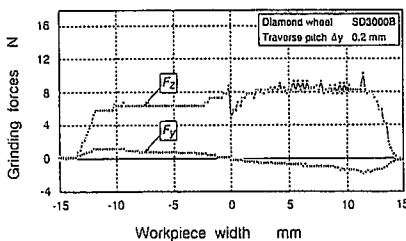
Truing conditions			
Wheel	SD600B75 1A1, 300°×25°	SD1500B120 1A1, 305°×15°	SD3000B150 1A1, 305°×15°
Wheel speed	1000m/min	1000-1500m/min	1000-1800m/min
GC cup wheel	GC1500B 6A2, 90°×20°	GC3000B 6A2, 90°×20°	GC8000B 6A2, 90°×20°
Truer speed	180m/min	180m/min	180m/min
Depth of cut	1.0μm	1.0μm	1.0μm
Table feed rate	2m/min	2m/min	2m/min
Swing speed	1.47rad/min	2.47rad/min	2.47rad/min
Truing fluid	Tap water, 5-10mL/min		
Grinding conditions			
Wheel speed	1800m/min	1800m/min	1800m/min
Depth of cut	10μm	1.0μm	1.0μm
Work speed	2m/min	2m/min	2m/min
Grinding fluid	Soluble type, 10L/min		



(a) point E



(b) point F



(c) point G

Fig. 23 Change of grinding forces

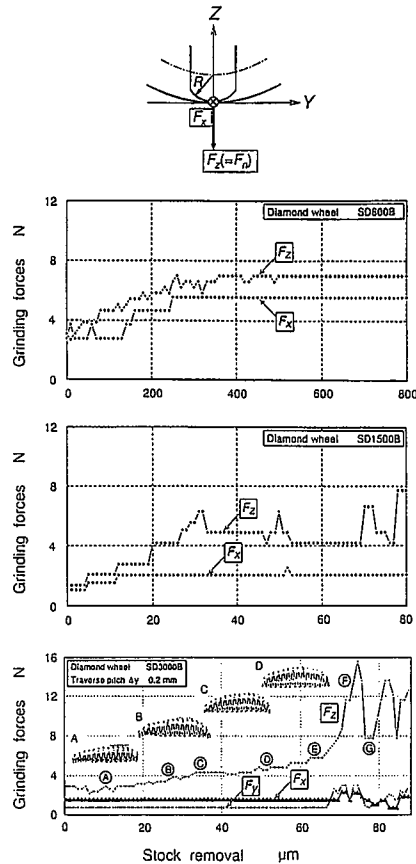


Fig. 22 Change of grinding forces

る研削抵抗分力  $F_x$ ,  $F_z$  を示す。図 22(c) は、 $\Delta y = 0.2\text{mm}$  のクロス送りを与えて SD3000B ホイールで研削した場合の工作物中央 ( $y=0$ ) における研削抵抗の 3 分力  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  を示したものである。

累積切込み量が増加するにつれて  $z$  軸方向の研削抵抗は微増し、 $70\mu\text{m}$  以降は急激に上昇する。実質的な除去が行われ始めた E 点での研削抵抗と  $y$  軸方向の位置との関係を図 23(a) に示す。図において、 $F_y$  が  $y=0$  を境に逆転するのは、ホイール断面上での研削点の位置が左右逆転し研削分力の向きが変わるためである。また  $F_z$  が  $y$  の増える方向で減少しているが、これはホイール軸の変位補正により加工面の修正が行われたためである。本実験は空調設備のある実験室で行ったが、全加工時間内に  $\pm 1^\circ\text{C}$  程度の温度変動があり約  $5\mu\text{m/h}$  の  $y$  軸方向の伸縮が認められたため、これらを約  $10\mu\text{m}$  の変化毎に NC 座標を補正した。

さらに、F 点で研削抵抗が急増しているのは、過剰補正によるものである。図 23(b) にその時の工作物幅方向の研削分力の分布を示すが、 $y$  が負の部分での研削抵抗が正の部分と比べて大きくなっている。この状態ではいわゆる片当たり状態となっている。そこで、 $y$  軸方向に逆の位置補正を行ったところ (G 点)、図 23(c) に示すように正常な値に戻っていることがわかる。

最終的に、1 回のツーリングでそれぞれ累積除去量  $1172\text{mm}^3$  (工作物中央での累積切込み量  $820\mu\text{m}$ )、 $178\text{mm}^3$  ( $80\mu\text{m}$ ) の研削を行ったが、依然として正常な研削が行われ、十分なドレス間寿命が得られたと考えられる。しかし SD3000B の場合には研削抵抗の増加率が SD600B, SD1500B と比較すると大きく、今回の研削実験では累積除去量  $42.9\text{mm}^3$  (工

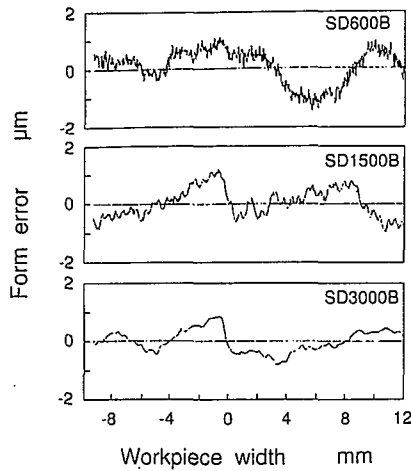


Fig. 24 Form error of ground surface

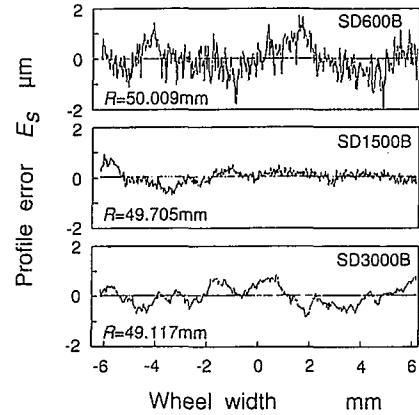


Fig. 25 Arc profile error  $E_s$  after truing

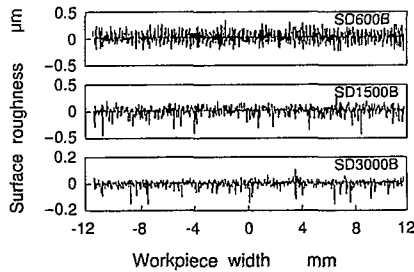


Fig. 26 Surface roughness of ground profile

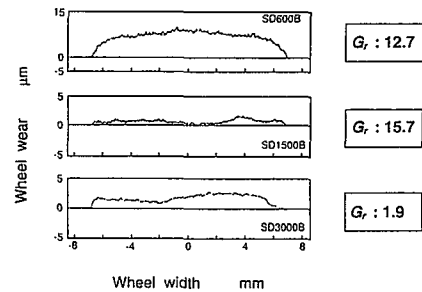


Fig. 27 Wheel wear profile

作物中央での累積切込量  $20\mu\text{m}$ ) で研削を中止した。

5.3.2 形状精度 図 24 は、研削後の工作物について所与の放物断面からの偏差を示したものである。SD600B, SD1500B ホイールの場合、 $\pm 1.2\mu\text{m}$  程度、SD3000B ホイールの場合  $\pm 0.8\mu\text{m}$  程度の偏差が残留した。このとき使用したホイールのツルーイング精度を図 25 に示すが、SD600B ホイールの場合  $\pm 1.8\mu\text{m}$  程度、SD1500B, SD3000B ホイールの場合  $\pm 0.8\mu\text{m}$  程度であった。この値は先に示した形状誤差の値とほぼ一致する。したがって円弧包絡研削法では、円弧ツルーイングの精度が、研削された工作物の形状誤差原因のもっとも大きなものであることが分かる。

5.3.3 仕上面粗さ 図 26 に、それぞれの加工段階における仕上げ面粗さを示す。SD600B では  $0.5\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 、SD1500B では  $0.55\mu\text{m}R_{\text{max}}$ 、SD3000B では  $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$  が得られた。

5.3.4 ホイール寿命 研削前後のホイール断面形状をカーボン薄板へ転写する方法で測定、比較することによりホイール摩耗を算出した。図 27 は、ホイール円弧断面からの偏差を研削前後で比較した一例である。差分をとったもので、縦軸はホイールの半径摩耗量に相当する。研削比  $Gr$  ( $=$  研削除去量 / ホイール摩耗量) を推定すると SD600B では  $Gr=1172\text{mm}^3/92.5\text{mm}^3=12.7$ 、SD1500B では  $Gr=178\text{mm}^3/11.3\text{mm}^3=15.7$ 、SD3000B では  $Gr=42.9\text{mm}^3/22.8\text{mm}^3=1.9$  が得られた。図 28 に鏡面研削した凹形放物柱面①の写真を示す。

#### 5.4 放物柱面②の研削

放物柱面② (曲線形状  $z=0.0015y^2$ ) の研削は、工作物の大型化への対応を考慮しながら実験を行った。前節の放物柱面①と同様に、最初に SD600B ホイールにより SiC の板材 ( $100\text{mm}^W \times 100\text{mm}^L \times 20\text{mm}^T$ ) から目標とする放物柱面を削り出した。この粗研削の後、SD1500B ホイールにより中研削、最後に SD3000B ホイールにより仕上げ研削を行った。図 29 に鏡面研削した凹形放物柱面②の写真を示す。

使用したホイールのツルーイング精度は SD600B, SD1500B, SD3000B それぞれ  $\pm 1\mu\text{m}$ 、 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 、 $\pm 1\mu\text{m}$  であった。このホイールで研削を行った工作物の  $y$  軸方向および  $x$  軸方向 (テーブル送り方向) の形状精度は  $y$  軸方向に関しては SD600B, SD1500B, SD3000B それぞれ  $\pm 2\mu\text{m}$ 、 $\pm 1.5\mu\text{m}$ 、 $\pm 1\mu\text{m}$ 、 $x$  軸方向に関しては  $\pm 1.5\mu\text{m}$ 、 $\pm 0.4\mu\text{m}$ 、 $\pm 1.5\mu\text{m}$  であった。

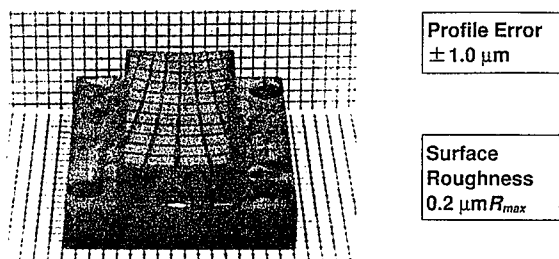


Fig. 28 Photograph of ground nonaxisymmetric SiC mirror (Parabolic cylinder)

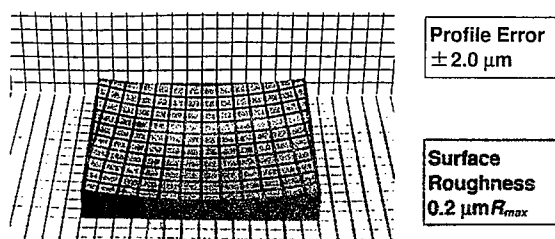


Fig. 29 Photograph of ground nonaxisymmetric SiC mirror (Parabolic cylinder)

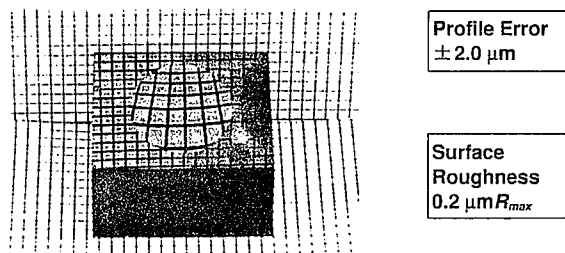


Fig. 30 Photograph of ground nonaxisymmetric SiC mirror (Toroidal)

により仕上げ研削を行った。使用した SD600B, SD3000B ホイールそれぞれのツルージング精度はそれぞれ  $\pm 1\mu\text{m}$ ,  $\pm 0.5\mu\text{m}$  であった。短軸方向の形状精度はそれぞれ  $\pm 1.5\mu\text{m}$ ,  $\pm 1\mu\text{m}$ , 長軸方向は  $\pm 1\mu\text{m}$ ,  $\pm 1\mu\text{m}$  であった。

SD3000B で研削した後の最終的な仕上げ面粗さは  $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$  であった。図 30 に鏡面研削したトロイダル面の写真を示す。

## 5.6 結 言

- (1)ホイール断面の形状精度が研削面に転写されるので、円弧ツルージングの精度が非常に重要である。
- (2)円弧包絡研削法ではホイールの全幅が使用され、ドレス間寿命を大きくできることが実験的に確認された。
- (3)SiC 放物柱面の創成研削加工を行い、(曲線形状  $z=0.0045y^2$ ) 加工幅 27mm×加工長さ 72mm について形状精度  $\pm 0.8\mu\text{m}$ , 表面粗さ  $0.2\mu\text{m} R_{\text{max}}$  の鏡面を得た。
- (4)SiC 放物柱面の創成研削加工を行い、(曲線形状  $z=0.0015y^2$ ) 加工幅 99mm×加工長さ 100mm について形状精度  $\pm 1.5\mu\text{m}$ , 表面粗さ  $0.2\mu\text{m} R_{\text{max}}$  の鏡面を得た。
- (5)SiC トロイダル面の創成研削加工を行い、(曲線形状、半径  $r=200\text{mm}$ , 半径  $r=100\text{mm}$ ) 加工幅 20mm×加工長さ 30mm について形状精度  $\pm 1.5\mu\text{m}$ , 表面粗さ  $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$  の鏡面を得た。

## 第 6 章 結 論

第 2 章においては従来の曲面創成研削ではホイールの研削点が常に一定になるように研削を行っているのに対して、円弧断面ホイールを用いた円弧包絡研削法による曲面創成研削ではホイール断面プロファイルに沿って研削点を移動させることができるのが大きな特徴である。そのため従来法では 1 点に集中していたホイール摩耗をホイール幅方向に分散させることが可能となり、目つぶれ、目づまりの低下、ドレス間寿命の増加により、セラミックス鏡面研削での問題点が解消できることを明らかにした。そして円弧包絡研削法における NC 制御方法の考察を行い、ホイールを軸方向に等ピッチ送りしても工作物表面形状精度に与える影響は無視できるほど小さいこと、またホイール形状の決定を行うための設計指針を明かにした。

第 3 章においては極めて困難とされる極微粒ダイヤモンドホイールの高精度ツルージング・ドレスングを有効に行うため新開発したレジノイドボンド GC ツルア砥石を用いたツルージング実験により、従来のビトリファイドボンド GC ツルア砥石と比較して砥粒切れ刃密度を高めることができることをホイール表面の SEM 観察により明らかにした。SD3000B の極微粒ダイヤモンドホイールに対して GC8000B のレジノイドボンド GC ツルア砥石を使用した場合には理論砥粒切れ刃密度の約 85% と高い値にツルージングできることがわかった。さらに極微粒ダイヤモンドホイール表面の砥粒切れ刃密度が高い場合には研削性能も高くなることを確かめ、開発したレジノイドボンド GC ツルア砥石が超精密非球面ミラー研削に適したツルア砥石であることを実証した。

第4章ではカップツールによる円弧ツルーイングを高精度に行うため、円弧ツルーイング装置の高精度化のための解析を行った。この結果に基づき、平面研削盤用円弧ツルーイング装置を試作した。そしてツルーイング精度を向上させるための最適ツルーイング条件について検討した。その結果、ホイールの形状誤差はホイール円弧断面半径 50mm に対して  $\pm 1\mu\text{m}$  以下の高精度ツルーイングが可能になった。またホイール外周振れも直径 300mm に対して  $2\mu\text{m}$  以下にすることができた。

第5章では、第2章で提唱した円弧包絡研削法に基づき、円弧断面を有する極微粒ダイヤモンドホイールによる非軸対称非球面ミラーの創成研削を行った。その結果、炭化けい素セラミックスに対して放物柱面、トロイダル面の創成研削を行い、放物柱面では非球面断面形状誤差  $\pm 0.8\mu\text{m}$  以下、表面粗さ  $0.2\mu\text{m}R_{\text{max}}$  の鏡面に研削加工することができた。

## 謝 辞

本研究を行うにあたり、絶えずご指導、ご鞭撻を賜りました東北大学工学部教授庄司克雄博士に深甚なる感謝を申し上げます。また研究をまとめるにあたり、有益かつ懇切なるご助言とご教示を賜りました東北大学工学部教授江村超博士、ならびに東北大学工学部教授清野慧博士に深く感謝の意を表します。さらに本研究の遂行にあたり、考え方、研究の進め方などについて終始変わらぬご指導を賜りました東北大学工学部助教授厨川常元博士に深く感謝の意を表します。

本研究の実験にあたり、ご教示をいただきました精密加工学講座の諸先輩の方々、ならびに実験機を借用させていただきました宮城県工業技術センターの方々にお礼を申し上げます。

さらに、多くのご支援、ご協力をいただきましたミクロン精密株式会社の方々にお礼を申し上げます。

なお、本研究は社団法人精密工学会産学協同研究協議会「極微粒ダイヤモンドホイールを用いた超精密鏡面研削に関する研究協力分科会」、ならびに社団法人精密工学会産学協同研究協議会「加工の超高速化および超精密化に関する研究協力分科会」の助成を得て行われたものであることを記して、感謝の意を表します。

## 参 考 文 献

- 1) 大柳宏之編：シンクロトロン放射光の基礎，丸善株式会社，(1996) 359-443.
- 2) 鈴木 弘，新野康生，村上慎二，難波義治：斜入射 X 線ミラー用超精密研削加工機の開発，精密工学会誌，60, 9 (1994) 1309-1313.
- 3) 鈴木 弘，平野 稔，阿部守年，新野康生，難波義治：X 線ミラー用気相成長炭化けい素の延性研削，精密工学会誌，61, 4 (1995) 571-575.
- 4) 鈴木 弘，新野康生，遠山退三，平野 稔，難波義治：オンマシン計測による斜入射 X 線ミラーの超精密研削，精密工学会誌，61, 9 (1995) 1285-1289.
- 5) 鈴木浩文，小寺 直，庄司克雄，厨川常元：SR 用軸外し回転楕円体ミラーの超精密加工—研削加工による形状創成一，1995 年度砥粒加工学会学術講演会講演論文集，(1995) 121-126.
- 6) 大森整：超精密鏡面加工に対応した電解インプロセスドレッシング(ELID)研削法，精密工学会誌，59, 9 (1993) 1451-1457.
- 7) 大森整：21 世紀の超精密加工技術—ELID による超精密鏡面加工システム—，機械と工具，38, 11 (1994) 15-22.
- 8) 飯島章男，小倉繁太郎，山本碩徳：放射光ミラーの超精密加工，精密工学会誌，52, 11 (1986) 1835-1838.
- 9) 大柳宏之編：シンクロトロン放射光の基礎，丸善株式会社，(1996) 414-417.
- 10) 松井正己，庄司克雄，山尾昌道：ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルーイングに関する研究(第1報)—各種ツルーイング法のツルーイング効果について—，精密工学会誌，52, 2 (1986) 291-296.
- 11) 松井正己，庄司克雄，朴承鎭：ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルーイングに関する研究(第2報)—カップツールによるツルーインガー—，精密工学会誌，53, 3 (1987) 486-490.
- 12) 田牧純一，庄司克雄：微粒ダイヤモンド砥石によるセラミックスの円筒鏡面研削，1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1989) 601-602.
- 13) L.Zhou, K.Syoji and T.Kuriyagawa: A New Technique for Truing of Superabrasive Wheels Used In Form-Grinding, SME Technical Papers, (1993) MR93-366.
- 14) T.Kuriyagawa, K.Syoji and L.Zhou: Precision Form Truing and Dressing for Aspheric Ceramics Mirror Grinding, NIST special publication, 847 (1993) 325-331.
- 15) 松井正己，庄司克雄，朴承鎭：ビトリファイドダイヤモンド砥石のツルーイングに関する研究(第2報)—カップツールによるツルーインガー—，精密工学会誌，53, 3 (1987) 486-490.
- 16) 庄司克雄，周立波：ダイヤモンド砥石のドレッシング及びドレッシングに関する研究—メタルダイヤモンド砥石におけるツルーイングおよびドレッシングのメカニズム—，精密工学会誌，55, 12 (1989) 2267-2272.
- 17) 庄司克雄，厨川常元，周立波，鈴木英俊，相原秀雄：総型研削用超砥粒ホイールのツルーイング法の開発に関する研究，精密工学会誌，59, 3 (1993) 117.

## 審査の結果の要旨

軟 X 線のような短波長光の光学系では、斜入射型の非球面ミラーが不可欠であるが、その加工は技術的に困難な多くの問題に直面している。その最大の理由は、材質が炭化珪素 (SiC) など難加工材であり、しかも鏡面と同時に高い形状精度が要求されることである。従来鏡面加工は、ポリッシング加工によることが多いが、形状精度の点では不利である。そこで著者は、新たに円弧包絡による創成研削法を提案し、非軸対称非球面ミラーの研削加工の実用化を目指して研究を行った。本論文は、それらの成果をまとめたもので、全編 6 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、円弧包絡法による曲面創成研削法の原理について述べている。これまでトロイダル面など非軸対称非球面は、5 軸同時制御の加工機を用いて研削が行われている。この方法では、加工精度が加工機の運動精度のみに依存するという利点がある。しかし、ホイール断面上の同一点で研削が行われるため、SiC のような難削材の大型ミラーでは、ホイールの目づまりや目つぶれのために研削途中でドレッシングを必要とし、非球面ミラーの加工精度を劣化させる原因となっている。これに対して本論文で提案している研削法ではホイール断面上で研削点が移動するため、ホイールの長寿命化が図れるほか、3 軸同時制御の加工機で十分実現できる。

第 3 章では、極微粒ダイヤモンドホイールの研究を行い、ツルーイング用砥石の開発を行っている。すなわち鏡面研削を行うためには、#3000 程度の極微粒ホイールを用いる必要があるが、そのような極微粒のダイヤモンドホイールのドレッシング法は、現在確立されていない。本研究では、カップツルア用に特殊なレジンボンド GC 砥石を開発し、好結果を得ている。これは、非球面ミラーの研削に限らず極微粒ホイールを用いた鏡面研削に広く応用が可能であり、高く評価される。

第 4 章では、ホイールの円弧ツルーイングについて述べている。すなわち円弧包絡研削法では、ホイール断面形状が工作物の断面に転写されるため、そのツルーイング精度が重要である。そこで円弧ツルアの創成機構を解析し、その問題点を明らかにすることによって、円弧ツルアの精度向上を図り成功している。これは、円弧包絡研削法の実用化を可能にただけでなく、総形研削用超砥粒ホイールのツルーイングに広く応用できる重要な成果である。

第 5 章では、以上の研究成果を基に、3 軸同時制御の超精密汎用研削盤を用いて非軸対称非球面ミラーを実際に研削し、円弧包絡研削法の長所と特に加工に伴う諸問題とその解決策について述べている。これは難削材を素材にした大型非軸対称非球面ミラー研削の実用化に必要な重要な多くの知見を与えており、その成果は高く評価される。

第 6 章は結論である。

以上要するに、本論文は、円弧包絡研削法による非軸対称非球面ミラーの加工を提案すると共に問題点を明かにし、その対策を示して実用化したもので、精密加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として合格と認める。